第 42 卷 第 4 期 天 文 学 进 展 Vol. 42, No. 4
2024 年 12 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Dec., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.04.06

恒星形成区 G10.32-0.15 中反馈机制的研究

张 幸[1,2]，李大磊[2]，加尔肯·叶生别克[2,1]

(1. 新疆大学，乌鲁木齐 830046； 2. 中国科学院 新疆天文台，乌鲁木齐 830011)

摘要： 反馈在恒星形成过程中扮演着重要角色，对于恒星和行星的形成、星团和母体分子云的演化都具有重要影响。利用多波段的红外数据以及亚毫米波的连续谱数据确定了恒星星团的位置以及致密尘埃团块 C1、C2、C3、C4 和 C5 的分布。NH_3 速度积分强度的分布与 870 μm 示踪的致密尘埃的分布具有很好的成协性，表明 NH_3 能很好地示踪致密分子气体。在局域热动平衡的假设下，结合 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的分子谱线数据，通过辐射转移计算获取了分子气体的速度场、速度弥散、旋转温度、NH_3 柱密度以及波束填充因子的分布。通过进一步的计算，得到了 G10.32-0.15 中气体的运动温度、声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值以及马赫数。综合分析以上结果，表明 G10.32-0.15 中的致密气体可能受到了恒星形成区多种反馈机制的影响：C1 区域的气体可能受到热反馈的影响，C2 和 C3 区域的气体可能受到爆炸反馈的影响，C4 和 C5 区域的气体可能受到动量反馈的影响。恒星形成区 G10.32-0.15 与周围的致密气体存在着复杂的相互作用，不同区域的气体可能由不同反馈机制主导。

关 键 词： 分子云；分子谱线；恒星形成

中图分类号： P142.9 **文献标识码：** A

1 引 言

恒星往往以成团的方式在分子云中形成[1]。在恒星形成的过程中，正在形成的恒星通过不断吸积周围的物质而增长，同时也伴随着各种各样的反馈过程，如星风、外流、辐射等。通过这些反馈过程，正在形成的恒星不断向母体分子云中输入物质、辐射、能量和动量，进而影响恒星和行星的形成以及母体分子云的演化等[2, 3]。Krumholz 等人[2]把恒星形成区的反馈分为三类：动量反馈 (momentum feedback)、爆炸反馈 (“explosive” feedback) 和

收稿日期： 2024-03-06； **修回日期：** 2024-03-25

资助项目： 中国科学院青年创新促进会；上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划 (2022E01050)

通讯作者： 李大磊，lidalei@xao.ac.cn；加尔肯·叶生别克，jarken@xao.ac.cn

热反馈 (thermal feedback)。动量反馈主要指恒星在形成过程中往母体分子云中注入动量，进而推动分子云中的气体运动，驱动分子云中的湍流等，典型的形式有原恒星产生的外流和辐射压；爆炸反馈主要指恒星快速地加热周围的气体，把气体的温度加热到非常高，同时也驱动周围气体运动，典型的类型为大质量恒星产生的星风、光电离反馈 (photoionization feedback) 以及超新星爆发；热反馈主要改变周围气体的温度结构，而不改变气体的运动状态，它主要源于非电离辐射。对恒星形成区反馈机制的研究一直是研究热点，国际一流的望远镜开展了重点观测项目来研究恒星形成区的反馈机制。例如，使用 SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) 空间红外望远镜开展的大型观测项目 FEEDBACK: Radiative and Mechanical Feedback in Regions of Massive Star Formation[4]；利用 JWST (James Webb Space Telescope) 正在开展的 PDRs4All: Radiative Feedback from Massive Stars 观测研究[5]。另外，关于巨分子云形成恒星星团的数值模拟也正在考虑多种反馈机制，如 STARFORGE (STAR FORmation in Gaseous Environments)[6]。

在单天线射电连续谱巡天观测中，G10.32-0.15 首次被发现，它位于包含电离氢区的分子云复合体 W31 的北部[7–9]。随后，多台射电望远镜对 G10.32-0.15 进行了多波段射电连续谱和射电复合线的观测研究，如德国 Effelsberg 100 m 望远镜开展的 5 GHz 连续谱观测[10]，日本 Nobeyama 45 m 望远镜开展的 10 GHz 连续谱观测[11]以及美国国家射电天文台 NRAO (National Radio Astronomy Observatory) 140 英尺望远镜 (1 英尺= 0.304 8 m) 开展的 $H_{109\alpha}$ 射电复合线观测[12]。Kim 和 Koo[13]基于 VLA (Very Large Array) 21 cm 波段的观测数据，发现了 G10.32-0.15 的射电双极结构。在星际分子气体探测方面，Wilson[14]利用 NRAO 的 42 m 射电望远镜，在 G10.32-0.15 中探测到了 OH 和 H_2CO 的吸收线。使用 Medicina 32 m 射电望远镜，Brand 等人[15]发现了 22 GHz 水脉泽辐射。利用 ATCA (Australia Telescope Compact Array)，Walsh 等人[16]探测到了 6.7 GHz 甲醇脉泽。利用 APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) 的 870 μm 连续谱数据以及 $^{13}CO(2\text{-}1)$ 和 $C^{18}O(2\text{-}1)$ 的分子谱线数据，Beuther 等人[17]对 G10.32-0.15 的大尺度分子气体的动力学性质以及其中致密团块的恒星形成活动开展了研究，致密的尘埃分布在双极电离氢区的腰部。Dewangan 等人[18]基于多波段的连续谱数据和分子谱线数据，研究了 G10.32-0.15 双极电离氢区中的触发恒星形成机制。

基于 2MASS (Two Micron All Sky Survey)[19]的巡天观测数据，Bica 等人[20]证认了与 G10.32-0.15 射电辐射成协的红外星团。Bik 等人[21]利用 VLT (Very Large Telescope) 近红外 K 波段的光谱数据，研究了这个红外星团中恒星的光谱型，发现了一颗 O5V-O6V 的大质量恒星，它主导了这个红外星团的近红外辐射，提供了电离氢区的电离辐射。利用深度的红外 UKIDSS (United Kingdom Infra-Red Telescope Infrared Deep Sky Survey) 的图像数据，Dewangan 等人[18]证认了距离这颗大质量恒星 $10''$ 以内的 14 颗恒星，并测量了这个星团与地球之间的距离，得到较精确的结果为 1.75 kpc。Townsley 等人[22]利用空间 X 射线天文台 Chandra 望远镜研究了这个红外星团的 X 射线辐射，在其中共探测到 50 多个 X 射线点源，同时也发现了 X 射线的延展弥散辐射。

综上所述，G10.32-0.15 距离地球 1.75 kpc，是一个主要被一颗 O 型星电离的双极电离

氢区，内部包含一个红外星团，双极电离氢区的腰部分布着正在进行恒星形成的致密分子气体。本文主要利用最新的 GBT (Green Bank Telescope) 100 m 射电望远镜 NH_3 银道面巡天的高灵敏度和高分辨率的观测数据，并结合多波段的连续谱数据，对 G10.32-0.15 中的反馈机制开展观测研究。本文第 2 章介绍了使用的多波段观测数据；第 3 章给出了利用观测数据得到的结果；第 4 章讨论了所得到的结果；第 5 章给出了全文的总结以及展望。

2 观测数据

2.1 分子谱线数据

$NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的分子谱线数据是 GBT 射电望远镜 NH_3 银道面巡天 RAMPS① (Radio Ammonia Mid-Plane Survey) 观测数据的一部分[23]。RAMPS 的巡天观测范围为银经 $l = 10° \sim 40°$，银纬 $b = -0.4° \sim 0.4°$。望远镜巡天配备的前端是 1.3 cm K 波段的七波束接收机 KFPA (K-band Focal Plane Array)，终端为 VEGAS (VErsatile GBT Astronomical Spectrometer)，NH_3 谱线数据的角分辨率为 32″，速度分辨率为 $0.2\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$。

2.2 连续谱数据

本文分析了恒星形成区 G10.32-0.15 从厘米波、亚毫米波到红外的多波段连续谱观测数据。其中，21 cm 波段射电连续谱的数据为 VLA 的观测数据，分辨率为 $5.4'' \times 6.2''$，噪声水平为每束 3.0 mJy[24]；亚毫米波段 870 μm 的连续谱数据来源于 APEX12 m 的银道面巡天观测项目 ATLASGAL[25] (APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy)，角分辨率为 19.2″，噪声水平约为 $70\,\mathrm{mJy{\cdot}beam^{-1}}$；红外波段数据是基于空间望远镜 Spitzer 的巡天观测项目 GLIMPSE[26] (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)，本文使用的波段为 3.6 μm、5.8 μm 和 8 μm。

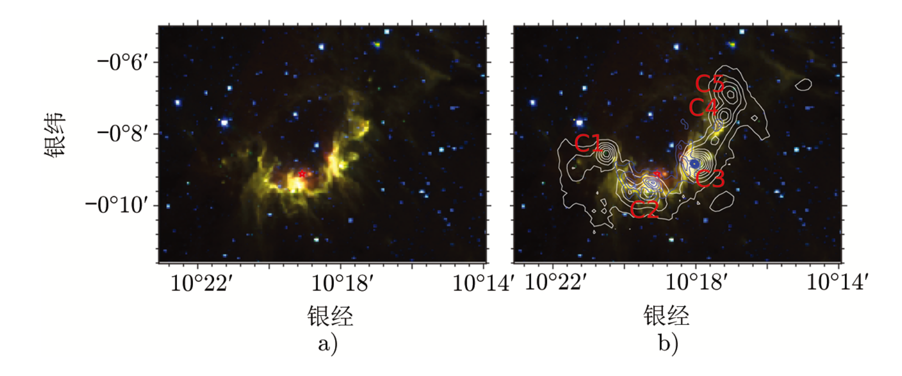
3 结 果

3.1 红外星团和致密尘埃团块的分布

G10.32-0.15 是一个双极电离氢区，其激发星是一颗光谱型为 O5V-O6V 的大质量恒星[18, 21]（见图 1 中的红色五角星）。这颗大质量恒星提供了整个电离氢区的电离辐射，主导了整个红外星团的近红外辐射[18]。图 1a) 为 3.6 μm、5.8 μm 和 8 μm 辐射所组成的三色图。3.6 μm 示踪红外星团中恒星的位置；8 μm 的辐射代表多环芳香烃 PAH 的辐射，很好地示踪了电离氢区的边界。

从图 1b) 中可以看出，870 μm 的辐射主要分布在电离氢区的边界上，与 8 μm 的辐射有很好的成协性。另外，基于 870 μm 的数据，Beuther 等人[17]证认了此区域的致密尘埃团块，其编号为 C1、C2、C3、C4 和 C5[18]。20 cm 的辐射主要源于电离气体的自由-自由辐射，主

①https://sites.bu.edu/ramps/



注：a) 由 3.6、5.8 和 8 μm 辐射绘制的三色图；b) 背景为 3.6、5.8 和 8 μm 辐射绘制的三色图，白色等值线和蓝色等值线分别代表 870 μm 辐射和 20 cm 辐射，等值线的数值从图像中最大数值的 10% 到 90%，间隔为 10%。C1、C2、C3、C4 和 C5 是 870 μm 的 5 个尘埃团块[18]。两图中的红色五角星代表激发星的位置[21]。

图 1 G10.32-0.15 的三色图

要集中在激发星附近（见 图 1b) 中的蓝色等值线）。这里使用的 20 cm 数据分辨率较高，只探测到较为致密的形态，而失去了之前使用低分辨率数据探测到的大尺度弥散结构[13]。团块 C3 含有非常致密的 20 cm 辐射，为已证认的 UCHII[27] (Ultra-compact HII region)。

3.2 NH_3 气体的分布

图 2 给出了致密尘埃团块 C1、C3 和 C5 的典型 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 分子谱线的轮廓。$NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 都有非常强的信号，并且在 $NH_3(1, 1)$ 中表现出明显的超精细结构。NH_3 为单一速度成分的轮廓，类似于 CS(2-1) 的谱线轮廓特征[28]，而 ^{13}CO(2-1) 和 C^{18}O(2-1) 含有多速度成分的谱线轮廓[17, 28]。

图 3 展示了 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的速度积分强度的分布图，可以看出 $NH_3(1, 1)$ 的分布比 $NH_3(2, 2)$ 稍微延展一些。NH_3 主要分布在电离氢区的边界上，与 870 μm 示踪的尘埃辐射有很好的成协性。在 870 μm 辐射最强的尘埃核中心，NH_3 的辐射也最强。与之前的结果相比，NH_3 与 CS(2-1) 的分布类似[28]，而不同于更为延展的 ^{13}CO(2-1) 分布[17]。

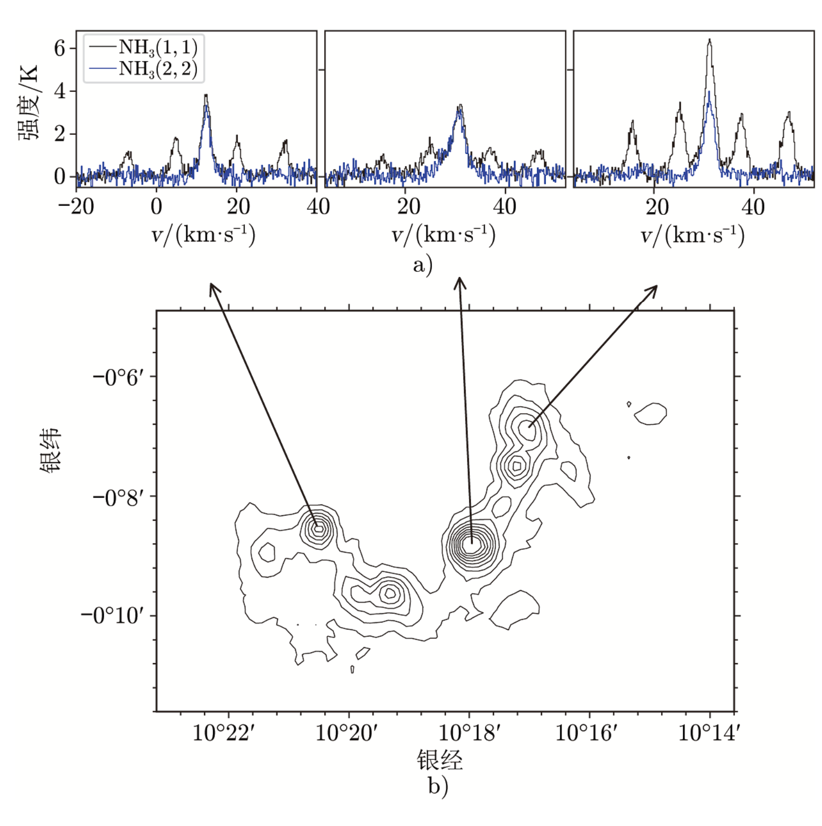
3.3 NH_3 谱线的拟合

在局域热动平衡的假设下，利用辐射转移公式 (1) 和 (4) 同时拟合 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的谱线数据，可得到气体的速度、速度弥散、NH_3 的柱密度、旋转温度和填充因子[29]。

NH_3 谱线的光深为：

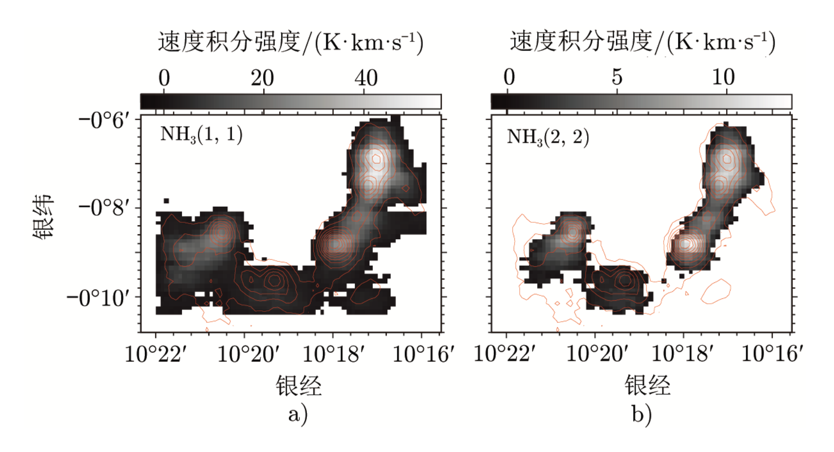
$$\tau = \frac{N_{\rm tot}g}{Q}\frac{A_{ul}c^2}{8\pi\nu_0^2}\frac{c}{\sigma\nu_0\sqrt{2\pi}}\frac{1-\exp\left[-h\nu_0/(k_{\rm B}T_{\rm rot})\right]}{1+\exp\left[-h\nu_0/(k_{\rm B}T_{\rm rot})\right]} \quad , \tag{1}$$

其中，$N_{\rm tot}$ 是柱密度，g 是能级的简并因子，Q 是配分函数，A_{ul} 是爱因斯坦 A 系数，c 是光速，ν_0 是静止频率，σ 是速度弥散，h 是普朗克常数，$k_{\rm B}$ 是玻尔兹曼常数，$T_{\rm rot}$ 是 $NH_3(1, 1)$ 与 $NH_3(2, 2)$ 间的旋转温度。



注：a) 为三个典型区域 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的谱线轮廓；b) 中黑色等值线代表 870 μm 的辐射，等值线的数值从图像中最大数值的 10% 到 90%，间隔为 10%。

图 2　NH_3 的典型谱线轮廓



注：a) $NH_3(1, 1)$ 的速度积分强度图；b) $NH_3(2, 2)$ 的速度积分强度图。两图中的红色轮廓是 870 μm 的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的 10% 到 90%，间隔为 10%。

图 3　NH_3 的速度积分强度图

$NH_3(1, 1)$ 不同超精细结构之间的强度比与光深之间的关系为[30]：

$$\frac{\Delta T^*_{a,\mathrm{m}}(J,K)}{\Delta T^*_{a,\mathrm{s}}(J,K)} = \frac{1-\exp\left[-\tau_{\mathrm{m}}(J,K)\right]}{1-\exp\left[-a\tau_{\mathrm{m}}(J,K)\right]} \quad , \tag{2}$$

其中，下标 m 和 s 分别代表超精细结构的主线和卫星线，ΔT^*_a 为谱线的观测强度，$\tau_{\mathrm{m}}(J,K)$ 为主线的光深，a 是卫星线与主线的强度比值。

$NH_3(1, 1)$ 与 $NH_3(2, 2)$ 之间的旋转温度 T_{rot} 为[30]：

$$\frac{\tau(J',K')}{\tau(J,K)} = \frac{\nu^2(J',K')}{\nu^2(J,K)} \cdot \frac{\Delta\nu(J,K)}{\Delta\nu(J',K')} \cdot \frac{T_{\mathrm{ex}}(J,K)}{T_{\mathrm{ex}}(J',K')} \cdot \frac{|\mu(J',K')|^2}{|\mu(J,K)|^2} \cdot \frac{g(J',K')}{g(J,K)} \cdot \exp\left[\frac{-\Delta E(J',K';J,K)}{k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{rot}}(J',K';J,K)}\right] \quad , \tag{3}$$

其中，$|\mu(J,K)|^2$ 为偶极矩阵元，ΔE 为能级差。

根据公式 (1)－(3)，并假设谱线的轮廓为高斯函数，可得到谱线的强度为：

$$I_\nu = f\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}}\Big[1-\exp\big(-\tau(\nu)\big)\Big]\left[\frac{1}{\exp\big(h\nu/(k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{rot}})\big)-1} - \frac{1}{\exp\big(h\nu/(k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{cmb}})\big)-1}\right] \quad , \tag{4}$$

其中，f 是填充因子，T_{cmb} 为宇宙微波背景辐射的温度。利用最小二乘法同时拟合 $NH_3(1, 1)$ 和 $NH_3(2, 2)$ 的谱线数据，可得到气体的速度、速度弥散、NH_3 的柱密度、旋转温度和填充因子的空间分布[23]（见图 4）。

从尘埃团块 C1 到 C5，气体的速度大约从 11 km·s^{-1} 增加到 15 km·s^{-1}，存在速度梯度（见图 4a)）。气体速度弥散的范围为 0.52~2.12 km·s^{-1}，平均值为 1.00 km·s^{-1}。速度弥散较大的区域为尘埃团块 C3 以及 C5 的东北方向（见图 4b)）。NH_3 柱密度的范围为 1.50×10^{15}~1.10×10^{16} cm^{-2}，平均值为 4.79×10^{15} cm^{-2}。填充因子的范围为 0.06~0.45，平均值为 0.20，其最大值所在的区域为尘埃团块 C4 和 C5 所在区域，但是也小于 0.5。NH_3 旋转温度的范围为 14.5~31.0 K，平均值为 20.1 K，旋转温度较高的区域为尘埃团块 C1、C2 和 C3 所在区域（见图 4e)）。

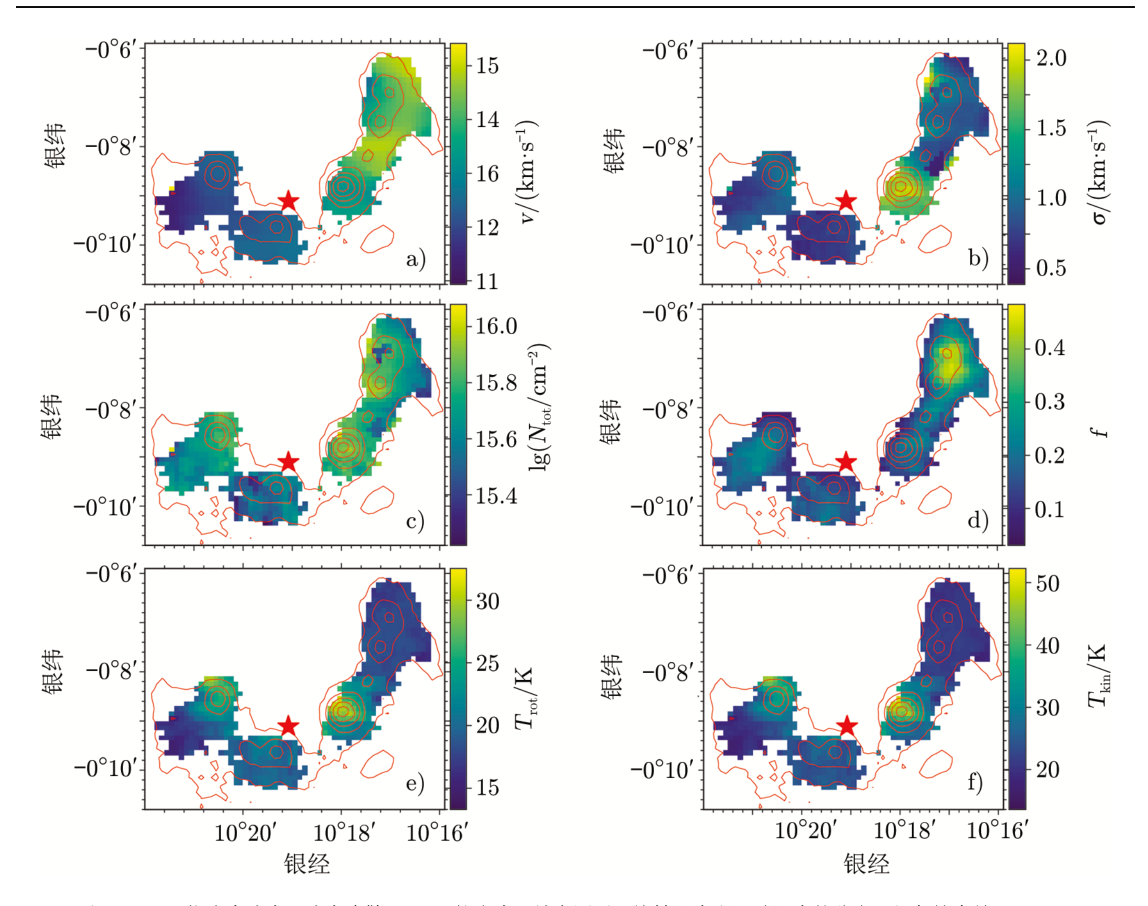
4 讨 论

4.1 气体的运动温度

通过蒙特卡洛算法模拟，Tafalla 等人[31]建立了 NH_3 旋转温度 T_{rot} 和气体运动温度 T_{kin} 之间的关系：

$$T_{\mathrm{kin}} = \frac{T_{\mathrm{rot}}}{1-T_{\mathrm{rot}}/42\ln[1+1.1\exp(-16/T_{\mathrm{rot}})]} \quad , \tag{5}$$

其中，T_{kin} 是运动温度，T_{rot} 是 $NH_3(2, 2)$ 与 $NH_3(1, 1)$ 之间的旋转温度。通过式 (5) 可以把 G10.32-0.15 的 NH_3 旋转温度转化成气体的运动温度（见图 4f)），运动温度的范围为 16.2~49.3 K，平均值为 25.3 K。



注：a)−f) 依次为速度、速度弥散、NH$_3$ 柱密度、填充因子、旋转温度和运动温度的分布，红色轮廓是 870 μm 的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的 10% 到 90%，间隔为 10%。红色五角星代表激发星的位置。

图 4 NH$_3$ 拟合参数的分布图

从图 4f) 可以看出，靠近激发星位置的尘埃团块 C1、C2 和 C3 的气体温度较高，而 C4 和 C5 所在区域的温度较低。这说明激发星以及星团中的其他恒星产生了热反馈，加热了周围的气体，而 C4 和 C5 受到的热反馈较小。尘埃团块 C3 除了靠近激发星位置的气体温度较高之外，其本身温度也较高，这是受 C3 中 UCHII[27] 的加热所致。

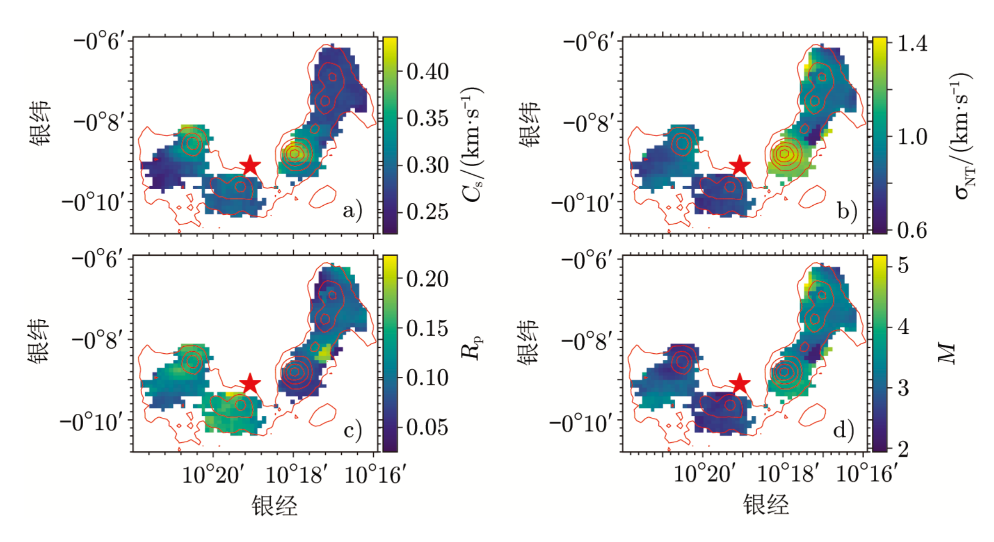
4.2 速度弥散和湍流

利用 NH$_3$ 的谱线数据可以较为精确地测量气体的温度，进而可研究气体中的热成分以及非热成分[32, 33]。利用式 (6)，由气体的运动温度得到气体的声速：

$$C_{\rm s} = \sqrt{\frac{k_{\rm B}T_{\rm kin}}{\mu m_{\rm H}}} \quad , \tag{6}$$

其中，μ 为分子云的平均分子量，$m_{\rm H}$ 是氢原子的质量。图 5a) 给出了 G10.32-0.15 区声速的分布，其范围为 0.24∼0.42 km·s^{-1}，平均值为 0.30 km·s^{-1}。由于声速与气体运动温度直接相关，因此声速与气体运动温度有同样的分布，即靠近激发星附近的 C1、C2 和 C3 团块具

有较大的声速，C4 和 C5 团块所在区域声速较小。



注：a)−d) 依次为声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值、马赫数的分布，红色轮廓是 870 μm 的辐射。等值线的数值从图像中最大数值的 10% 到 90%，间隔为 10%。五角星代表激发星的位置。

图 5　推导参数的分布

分子谱线的展宽包含热展宽和非热展宽两部分[32]。因此，从谱线轮廓中减去热成分的展宽就可以得到非热成分的展宽。非热速度弥散为[34]：

$$\sigma_{NT} = \sqrt{\sigma_{NH_3}^2 - \frac{k_B T_{kin}}{m_{NH_3}}} \quad , \tag{7}$$

其中，σ_{NH_3} 是 NH_3 谱线得到的速度弥散，m_{NH_3} 是 NH_3 的质量。图 5b) 给出了 G10.32-0.15 区非热速度弥散的分布，其范围为 0.65~1.42 km·s^{-1}，平均值为 0.93 km·s^{-1}。从图中可以看出，非热速度弥散较强的地方为 C3 团块和 C5 团块的东北方向。C3 是一个活跃的恒星形成区，其非热速度弥散可能由外部的激发星以及内部的恒星形成活动共同驱动。 C5 团块的东北方向具有较大的非热速度弥散，但运动温度较低，这可能是激发星以及所在星团产生动量反馈的结果，即改变了气体的运动状态而非温度。

通过进一步分析热成分和非热成分，可获得热压和非热压的比值[35] $R_p = C_s^2/\sigma_{NT}^2$。图 5c) 给出了 G10.32-0.15 区 R_p 的分布，其范围为 0.03~0.21，平均值为 0.11。由图可知，绝大部分 R_p 低于 0.2，因此非热压主导了整个恒星形成区。热压与非热压比值相对较高的区域为尘埃团块 C1 和 C2 所在的区域，而在其他区域比值较低。

图 5d) 给出了 G10.32-0.15 区马赫数 $M = \sigma_{NT}/C_s$ 的分布，其范围为 2.16~5.36，平均值为 3.13。由于马赫数的最小值大于 2，因此在整个恒星形成区，气体都是超音速的。另外，在尘埃团块 C5 的东北方向，马赫数在 5 左右，所以此处的气体为超高音速。

4.3　反馈机制

依据 Krumholz 等人[2] 关于反馈机制的分类方法，我们可对 G10.32-0.15 中的反馈机制

开展研究。尘埃团块 C1 区域的气体温度较高，但速度弥散相对较小，C1 区域的气体可能受到热反馈机制的影响。在靠近激发星位置的 C2 和 C3 团块中探测到 20 cm 的自由-自由辐射；另外，这个区域的气体温度较高，速度弥散较大，因此，这个区域的气体可能受到爆炸反馈机制的影响。尘埃团块 C4 和 C5 区域的气体运动温度较低，但是速度弥散较大，尤其是 C5 区域的东北方向，含有马赫数在 5 左右的超高音速气体；因此，C4 和 C5 区域可能受到动量反馈机制的影响。综上所述，在恒星星团形成区 G10.32-0.15 中，不同区域受到反馈的影响可能由不同的机制主导。

5 总 结

使用 NH_3 谱线和多波段的连续谱数据，我们对恒星形成区 G10.32-0.15 开展了研究，所得结果总结如下：

(1) NH_3 的速度积分强度图与 870 μm 辐射示踪的致密尘埃的分布成协，表明 NH_3 能很好地示踪致密分子气体；

(2) 在局域热动平衡的假设下，利用分子辐射转移的计算方法同时拟合 NH_3(1, 1) 和 NH_3(2, 2) 的谱线数据，获取了 NH_3 的速度、速度弥散、柱密度、旋转温度以及填充因子的分布；

(3) 基于拟合的参数分布，进一步得到了分子气体的运动温度、声速、非热速度弥散、热压与非热压的比值以及马赫数，整个恒星形成区的气体主要由非热成分主导；

(4) 通过对运动温度、非热速度弥散、马赫数以及 20 cm 辐射等数据的综合分析，发现在 G10.3-0.15 恒星形成区中可能存在动量反馈、爆炸反馈（电离反馈）和热反馈，并且不同区域可能由不同的反馈机制所主导。

参考文献：

[1] Lada C J, Lada E A. ARA&A, 2003, 41: 57

[2] Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. Protostars and Planets VI, Tucson: University of Arizona Press, 2014: 243

[3] Inutsuka S, Aikawa Y, Muto T, et al. Protostars and Planets VII, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2023: 233

[4] Schneider N, Simon R, Guevara C, et al. PASP, 2020, 132(1016): 104301

[5] Berné O, Habart É, Peeters E, et al. PASP, 2022, 134(1035): 054301

[6] Grudić M Y, Guszejnov D, Hopkins P F, et al. MNRAS, 2021, 506(2): 2199

[7] Westerhout G. Bull Astron Inst Netherlands, 1958, 14: 215

[8] Goss W M, Shaver P A. Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement, 1970, 14: 1

[9] Shaver P A, Goss W M. Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement, 1970, 14: 77

[10] Altenhoff W J, Downes D, Pauls T, et al. A&AS, 1979, 35: 23

[11] Handa T, Sofue Y, Nakai N, et al. PASJ, 1987, 39: 709

[12] Reifenstein E C, Wilson T L, Burke B F, et al. A&A, 1970, 4: 357
[13] Kim K T, Koo B C. ApJ, 2001, 549(2): 979
[14] Wilson T L. A&A, 1974, 31: 83
[15] Brand J, Cesaroni R, Caselli P, et al. A&AS, 1994, 103: 541
[16] Walsh A J, Burton M G, Hyland A R, et al. MNRAS, 1998, 301(3): 640
[17] Beuther H, Linz H, Henning T, et al. A&A, 2011, 531: A26
[18] Dewangan L K, Ojha D K, Grave J M C, et al. MNRAS, 2015, 446(3): 2640
[19] Garzon F, Epchtein N, Omont A, et al. The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys, Netherlands: Kluwer Academic Publishing Company, 1997: 25
[20] Bica E, Dutra C M, Soares J, et al. A&A, 2003, 404: 223
[21] Bik A, Kaper L, Hanson M M, et al. A&A, 2005, 440(1): 121
[22] Townsley L K, Broos P S, Garmire G P, et al. ApJS, 2018, 235(2): 43
[23] Hogge T, Jackson J, Stephens I, et al. ApJS, 2018, 237(2): 27
[24] White R L, Becker R H, Helfand D J. AJ, 2005, 130(2): 586
[25] Schuller F, Menten K M, Contreras Y, et al. A&A, 2009, 504(2): 415
[26] Churchwell E, Babler B L, Meade M R, et al. PASP, 2009, 121(877): 213
[27] Wood D O S, Churchwell E. ApJS, 1989, 69: 831
[28] Kim K T, Koo B C. ApJ, 2002, 575(1): 327
[29] Mangum J G, Shirley Y L. PASP, 2015, 127(949): 266
[30] Ho P T P, Townes C H. ARA&A, 1983, 21: 239
[31] Tafalla M, Myers P C, Caselli P, et al. A&A, 2004, 416: 191
[32] Zuckerman B, Evans N J I. ApJ, 1974, 192: L149
[33] Larson R B. MNRAS, 1981, 194: 809
[34] Myers P C. ApJ, 1983, 270: 105
[35] Lada C J, Bergin E A, Alves J F, et al. ApJ, 2003, 586(1): 286

Study the Feedback Mechanism in Star Forming Region G10.32-0.15

ZHANG Xing[1,2], LI Dalei[2], ESIMBEK Jarken[2,1]

(1. University of Xingjing, Urumqi 830046, China; 2. XinJiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Feedback plays an important role in star formation and strongly impacts the formation of stars and planets, and the evolution of the star cluster and the parental molecular cloud. Multi-wavelength studies of star forming region G10.32-0.15 were conducted using the $NH_3(1, 1)$ and $NH_3(2, 2)$ spectrum line data of the ammonia molecule observed with the GBT and with the inclusion of multi-wavelength continuum data from the cm, sub-mm to infrared bands. The infrared star cluster and dense dust clumps C1, C2, C3, C4 and C5 are identified in the source based on the multi-wavelength infrared and sub-mm continuum data. The NH_3 velocity-integrated intensity distribution is clearly associated with the dense dust

distribution detected by 870 μm emission, indicating that NH_3 is a good dense gas tracer. The distribution of velocity, velocity dispersion, rotation temperature, NH_3 column density and filling factor can be derived by fitting a radiation transfer model to the $NH_3(1, 1)$ and NH_3 (2, 2) data under the assumption of Local Thermal Equilibrium. Furthermore, the kinetic temperature, the sound speed, the non-thermal velocity dispersion, the ratio between thermal pressure and non-thermal pressure, and the Mach number are derived based on those fitted parameters. From the above results, the dense gas in G10.32-0.15 is affected by multiple feedback processes: the dense gas in C1 is likely affected by thermal feedback, the dense gas in C2 and C3 is likely affected by explosive feedback, and the dense gas in C4 and C5 is likely affected by momentum feedback. Therefore, very complicated interactions exist between the infrared star cluster and the surrounding gas and different feedback mechanisms maybe dominate the different regions in G10.32-0.15.

Key words: molecular cloud; molecular spectrum line; star formation